基于 GRB051117A 的能谱延迟及其耀发特性的研究[1]

常学钊，彭朝阳+，王道周，陈家明

（云南师范大学 物理与电子信息学院，云南 昆明 650092）

摘要： Margutti 等人发现在 8 个伽玛暴中，耀发的谱延迟与耀发特性参数（峰值时间、宽度、上升时间、衰减时间）有较强相关性，随着时间的推移，耀发变宽，谱延迟变大。我们使用离散交叉相关函数（DCF）对一个具有 10 个耀发的多耀发伽玛暴（GRB051117A）进行谱延迟研究，发现在 GRB051117A 内，谱延迟与耀发的峰值时间、宽度、上升时间、衰减时间也存在较强的相关性，即$lag \propto t_{peak}$、w、t_{rise}、t_{decay}。在伽玛暴内部耀发也会随时间演化,即随着时间的推移，耀发的宽度越宽，谱延迟越大。本工作将伽玛暴之间存在的谱延迟与耀发特性参数之间的关系拓展到了伽玛暴内部 ,可以帮助我们对多耀发伽玛暴有更深的理解。并且 GRB051117A 内部的耀发特性参数之间存在的相关关系与多个伽玛暴之间甚至是瞬时辐射脉冲高度相似，这也为 X 射线耀发与瞬时辐射脉冲可能是同一物理起源提供支持。

关键词：伽玛射线暴；X 射线耀发；DCF；谱延迟

1 引言

伽玛射线暴（伽玛暴）是近几十年来观测到的最剧烈的天文现象之一，伽玛暴由瞬时辐射和余辉两部分组成。对伽玛暴的能谱延迟的研究近几十年也没有中断过，伽玛暴的能谱延迟指的是伽玛暴高低能光子到达时间存在差异，一般来说高能光子比低能光子先到达，这就形成了正延迟，若是低能光子比高能光子先到达，就形成了负延迟。研究伽玛暴的能谱延迟对伽玛暴的起源和伽玛暴宇宙学研究具有重大的意义[1-2]。通常计算伽玛暴能谱延迟的方法有拟合光变曲线法和交叉相关函数法（CCF）。

CCF 方法用来估计伽玛暴的能谱延迟是非常广泛的[1-4,6]。Norris 等人[1]发现伽玛暴的谱延迟与伽玛暴的光度存在负相关的关系，Ukwatta 等人[2]通过扩大样本也得到了相似的结论，通过确定了谱延迟与光度的负相关关系，可以对伽玛暴的红移进行估计，这就使得我们可以从伽玛暴谱延迟的角度来对伽玛暴宇宙学进行探索；Hakklia 等人[3]对 BATSE 数据库中的 2000 多个伽玛暴的谱延迟进行了统计，并给出了伽玛暴谱延迟的正负比例；Yi 等人[4-5]通过

---

*国家自然科学基金资助项目（11763009）
作者简介：常学钊，男，硕士研究生，研究方向：伽玛射线暴.Email: 871711346@qq.com
+通讯作者：彭朝阳，男，教授. 研究方向：伽玛射线暴.Email: pengzhaoyang412@163.com

对长暴和短暴的比较，发现长暴中的能谱延迟与其持续时间为正相关关系，而短暴中并没有发现这个关系，并对比了相对谱延迟$R = \tau/\Delta T$的的分布，发现长暴和短暴的 R 的分布形状没有差异但是 R 的大小存在差异；Roychoudhury 等人[6]分析了一个多脉冲的伽玛暴（GRB060814）, 发现这个暴的第 1、2、4 脉冲是正延迟而第 3 个脉冲是负延迟，并且各脉冲的光谱演化趋势相同。虽然造成伽玛暴能谱延迟的原因目前还不清楚，但是伽玛暴谱的演化[7]和曲率效应[8]是被大家普遍认可的原因，另外也有人认为伽玛暴谱延迟是谱演化和曲率效应共同作用的结果[9]。

目前，对于伽玛暴谱延迟的研究，主要是对 CGRO/BATSE，SWIFT BAT 和 Fermi 的数据的研究，也就是说主要集中在对伽玛波段瞬时辐射脉冲的研究，对于 X 射线余辉中的耀发的能谱延迟研究是比较少。而 X 射线余辉耀发与瞬时辐射脉冲具有相同的起源是被广泛认可的。Burrows[10]提出耀发是在后期由内部激波产生，这需要 GRB 中央引擎的重新激活，许多学者也得到了类似的结论[11-13]。Chincarini 等人[14]利用 SWIFT XRT 数据库中获得的 113 个耀发，研究了不同 X 射线能谱带能量下耀发时间特性的演化。X 射线耀发中同样存在谱延迟的现象，Margutti 等人[15]对 SWIFT XRT 的 8 个伽玛暴（包含 9 个耀发）进行了能谱延迟的研究，发现耀发中的谱延迟与耀发的特性参数之间是正相关关系，并得到了耀发中谱延迟与光度的关系，这个关系与瞬时辐射脉冲中的关系相似，所以得出耀发与瞬时辐射脉冲具有同一起源机制这个结论；Sonbas 等人[16]也支持 X 射线耀发和瞬时辐射脉冲具有共同起源。但是他们并没有对多耀发的伽玛暴能谱延迟性质做详细的研究。GRB051117A 是一个具有复杂光变曲线结构的多耀发伽玛暴，在其前 2000 秒的观测中至少包含 10 个耀发, Goad 等人[17]对这个明亮的伽玛暴多波段进行了研究, 发现其点源强度和光谱的特性参数具有显著相关性, 如光子指数、硬度比和拐折能量；Chincarini 等人[14]也对这个暴的耀发特性参数和光谱参数之间的关系进行了研究。然而他们并没有系统讨论这个暴的能谱延迟性质，所以我们打算从能谱延迟的角度研究多耀发伽玛暴（GRB 051117A）。

我们估计了所有耀发的延迟并分析耀发特性参数之间的相关性，与 Marguttii 等人[15]文中 9 个耀发中存在的延迟与耀发特性参数之间的相关关系作比较，并且讨论 GRB051117A 内部耀发的特性参数之间的相关关系，与瞬时辐射脉冲作直观的比较，使我们可以对这个多耀发伽玛暴 GRB051117A 有更深的认识。

2 样本处理和分析方法

XRT 数据使用 HEASOFT 软件包 v6.26.1 和相应的校准文件进行处理。这个暴的 0.3-10keV X 射线余辉光变曲线来自 Swift/XRT 网站[18-19](https://www.swift.ac.uk/)，本网站可以同时获得 0.3-1.5keV 和 1.5-10keV 能道的数据，当伽玛暴光源亮度大于几个 count^{-1} 时，数据使用 Windowed Timing (WT)模式处理，当光源亮度降低时，航天器自动切换到 Photon Counting

(PC)模式来观测伽玛暴，为了确保我们选择的耀发是明亮的，我们选择 GRB 051117A 中 WT 模式下的光变曲线，GRB 051117A 光变曲线如图 1 所示。

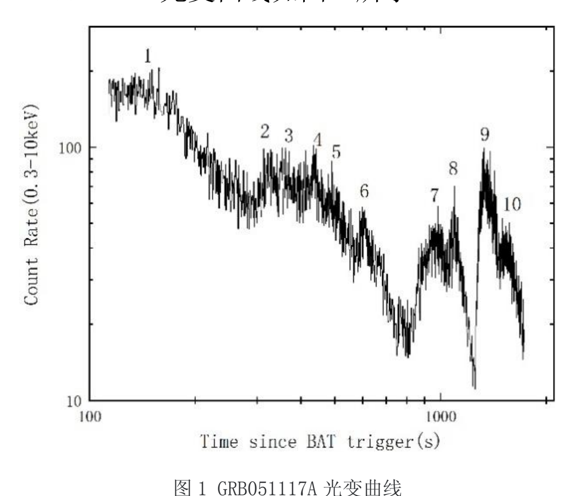


图 1 GRB051117A 光变曲线

Fig.1 The light curve of GRB051117A

Chincarini 等人[14]用 Norris 函数[20]拟合这个暴的 10 个耀发，Norris 函数[20]拟合耀发可以给出耀发的特性参数，如耀发上升时间、衰减时间、峰值时间、宽度和不对称性。Norris 函数[20]定义如下

$$I_{(t)}=A\lambda\exp\left[-\frac{\tau_1}{(t-t_s)}-\frac{(t-t_s)}{\tau_2}\right] \quad \text{for } t > t_s \tag{1}$$

其中$\lambda = exp\ (2\mu)$，$\mu = (\tau_1/\tau_2)^{1/2}$，$t_s$ 是耀发的起始时间，具体定义可以参考 Norris 这篇文章[20]。耀发峰值参数为

$$t_{peak} = t_s + (\tau_1\tau_2)^{1/2} \tag{2}$$

耀发宽度为在耀发开始和结束的两个强度点$1/e$处的距离，即

$$w = t_{decay} + t_{rise} = \tau_2(1+4\mu)^{1/2} \tag{3}$$

耀发的不对称性为

$$k = \frac{t_{decay}-t_{rise}}{t_{decay}+t_{rise}} = (1+4\mu)^{(-1/2)} \tag{4}$$

上升时间 t_{rise} 和衰减时间 t_{decay} 用 w 和 k 表示为

$$t_{decay,rise} = \frac{1}{2}w(1 \pm k) \tag{5}$$

SWIFT XRT 的数据是离散的，所以我们只能使用离散的交叉相关函数（DCF）来估计能谱延迟，DCF 与 CCF 具有相同的原理。由于 GRB051117A 光变曲线结构的复杂性，DCF 方法比拟合光变曲线法更适用于这个暴能谱延迟的估计。我们从 Chincarini 等人[14]文章中得到了 GRB051117A 的耀发特性参数数据并用 DCF 来估计每个耀发的谱延迟，结果如表 1 所示，DCF 定义如下[21][22]

$$DCF(d,x,y) = \frac{\sum_{i=max(1,1-d)}^{min(N,N-d)} x_i y_{i+d}}{\sqrt{\sum_i x_i^2}\sqrt{\sum_i y_i^2}} \tag{6}$$

其中 x_i，y_i 是两个光变曲线第 i 个时间片的光子数，N 是光变曲线时间片的个数，d 是 y 光变曲线相对于 x 光变曲线的偏移值，DCF 是关于 d 的函数。我们得到了 DCF 关于 d 的变化曲线，并用高斯函数拟合了这个 DCF 曲线。当两个能道的光变曲线形态相差很大的时候，我们需要用更复杂的函数去拟合 DCF 曲线，比如高阶的多项式或者 Norris 函数[20]。在我们

的样本中，高斯函数已经可以较好的拟合我们的样本，所以我们统一使用高斯函数去拟合 DCF 曲线。高斯拟合曲线的峰值是我们所求的两个光变曲线相关性最好的点，我们把它设为d′，所以能谱延迟定义为：$lag = d' \times \Delta t$，$\Delta t = T/N$, T 是时间序列的总长度。这种计算延迟的方法其实是计算了整个耀发的综合延迟。

我们用 Monte Carlo 模拟来估计延迟的误差，具体操作步骤如下：我们假设光变曲线每个时间片光子计数率的误差符合期望为 0 方差为 1 的正态分布，在这个分布下我们随机抽取每个时间片的光子计数率，产生一组模拟光变，用 DCF 估计这组模拟光变的能谱延迟得到一个延迟值。重复这个步骤 1000 次，就可以得到 1000 个延迟值，统计这 1000 个延迟值可以得到它们的标准偏差，我们把这个标准偏差当作谱延迟的误差[2]。

3 结果

3.1 谱延迟与耀发特性参数相关关系研究

GRB051117A10 个耀发的延迟结果如表 1 所示，其中，第五个耀发在考虑误差的情况下我们认为延迟为 0，其他 9 个耀发的谱延迟与自身耀发特性参数的关系如图 2 所示。其中，红色点是 GRB051117A 的 9 个耀发，蓝色三角、黑色方块、绿色星号都是来自 Norris 等人[20]05 年的(以下简称 N05)文章中各能道的脉冲,N05 使用的的是 BATSE/CGRO 的数据。我们定义 $lag_{i1} = t_{peak(1)} - t_{peak(i)}$，其中 i=2、3、4，这样可以计算出第二（50-100keV）、第三（100-300keV）、第四（>300keV）能道与第一（25-50keV）能道之间的谱延迟，因为 N05 样本给出的都是长延迟暴（lag_{31}普遍>1-2s），所以我们计算的谱延迟主要集中在 10^{-1}-10^{1} 这个量级之间。之后探究其与第一能道的脉冲特性参数之间的相关关系。然后与耀发中存在的延迟与参数之间的关系作比较，可以为耀发与脉冲可能是同一起源提供证据。

图 2 的左上部分显示了 GRB051117A 中谱延迟与耀发峰值时间之间的关系，最佳拟合关系为$t_{peak} = 10^{(2.64\pm0.18)} lag^{(0.33\pm0.35)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.45（p=2.2×$10^{-1}$），这说明随着时间的推移，耀发的谱延迟越来越大。

图 2 的右上部分显示了 GRB051117A 中谱延迟与峰值宽度之间的关系，最佳拟合关系为 $w = 10^{(1.85\pm0.1)} lag^{(0.52\pm0.2)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.57（p=1.2×$10^{-1}$）。在多耀发伽玛暴中，耀发的谱延迟的大小与自身宽度成正比，耀发越宽，谱延迟越大。

我们发现，这 9 个耀发的谱延迟中值为 2.01s，平均值为 3.55s，宽度的平均值为 130s，我们之前统计了 48 个多耀发伽玛暴（包含 137 个耀发），发现 123 个正延迟耀发的谱延迟中

值为 3.55s，平均值为 5.18s，平均持续时间为 185.5s。耀发中延迟与持续时间/宽度之间是正相关关系。GRB051117A 中的谱延迟比较小，是因为它的持续时间/宽度比较小。

图 2 的左下部分和右下部分分别显示了耀发的上升时间和衰减时间与谱延迟的关系，可以看出，耀发的上升时间和衰减时间都对谱延迟的大小产生影响。耀发的上升时间与谱延迟的相关关系为$t_{rise}=10^{(1.4\pm0.09)}lag^{(0.49\pm0.18)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.8（p=1.3×$10^{-2}$）；耀发的衰减时间与谱延迟的相关关系为$t_{decay}=10^{(1.64\pm0.13)}lag^{(0.55\pm0.24)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.6（p=9.68×$10^{-2}$）。在 GRB051117A 中耀发的上升时间与衰减时间越大，耀发的谱延迟越大，这与多个伽玛暴之间存在的关系是一致的[15]。

从图 2 可以看出，在瞬时辐射脉冲中，也存在与 GRB051117A 耀发中类似的延迟与参数之间的相关关系，即在瞬时辐射脉冲中，也普遍存在$\mathrm{lag}\propto t_{peak}$、$w$、$t_{rise}$、$t_{decay}$这样的相关关系，这也为 X 射线耀发与瞬时辐射脉冲可能是同一物理起源提供支持。

3.2 耀发特性参数之间的相关关系研究

通过对 GRB051117A 内 10 个耀发的谱延迟与特性参数之间的关系的研究，我们认为伽玛暴之间存在的延迟与特性参数之间的关系可以拓展到伽玛暴内部，本节我们将讨论多耀发伽玛暴内部的耀发特性参数之间的相关关系，与多个伽玛暴之间、瞬时辐射脉冲中存在的特性参数之间的相关关系作比较，使我们可以对多耀发伽玛暴认识更全面。

我们从 Margutti 等人[15]2010 年文章（以下简称 M10）中获得了 9 个耀发的特性参数数据，从 N05 中获得了 115 个脉冲的特性参数数据，N05 中的脉冲分为 4 个能道，我们通过公式 5 计算了这些脉冲的上升时间 t_{rise} 与衰减时间 t_{decay}

具体定义请参考 Norris 等人[20]2005 年的工作。

图 3 的左上部分显示了耀发/脉冲上升时间与衰减时间的相关关系，GRB051117A 中耀发衰减时间与上升时间最佳拟合关系为$t_{decay}=10^{(0.36\pm0.41)}t_{rise}^{(0.98\pm0.26)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.75 (p=1.84×$10^{-2}$)，可以看出，不管是 GRB051117A、M10 还是 N05，上升时间都与衰减时间呈正相关关系，而且所有点都遵循 $t_{decay}>t_{rise}$，在 GRB051117A 中，$t_{decay}\sim1.9t_{rise}$，前人发现在耀发中 t_{decay} 大约是 2 倍的 t_{rise}[14][15]，这个比例与本文给出的 GRB051117A 存在的耀发衰减时间与上升时间的比例是相似的。

图 3 的右上部分显示了峰值时间与宽度的相关关系，GRB051117A 中峰值时间与宽度最佳拟合关系为$t_{peak}=10^{(0.58\pm0.54)}w^{(0.53\pm0.19)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.73（p=2.12×$10^{-2}$），可以看出，GRB051117A 中耀发峰值时间与耀发宽度成正相关关系，即随着 GRB051117A 余辉时间的推移，新产生的耀发宽度越来越大，这可能也是上文提出随着时间的推移，耀发谱延迟增大的原因。结合图 2 以及图 3 分析，在 GRB51117A 中，耀发是随着时间演化的，随着时间的推移，耀发的宽度越大，耀发的延迟越大，这一点也支持了 Margutti 等人[15]的结论。

可以看出，脉冲中也存在类似的耀发峰值时间与宽度的正相关关系，不过与 GRB051117A 与 M10 中给出的耀发相比，脉冲中这种耀发峰值时间与宽度的正相关关系比较弥散，而耀发中却比较收敛，这种现象产生的原因是值得我们以后研究的问题。

图 3 的左下和右下部分分别显示了峰值时间与上升时间与衰减时间的关系，GRB051117A 中峰值时间与上升时间最佳拟合关系为$t_{rise} = 10^{(0.15\pm0.38)} t_{peak}^{(0.52\pm0.17)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.78（$p=1.17\times10^{-2}$），峰值时间与衰减时间最佳拟合关系$t_{decay} = 10^{(0.35\pm0.64)} t_{peak}^{(0.55\pm0.23)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.7（$p=3.11\times10^{-2}$）。M10 与 N05 样本也存在与 GRB051117A 中相似的关系。耀发的上升时间 t_{rise} 和衰减时间 t_{decay} 都与峰值时间 t_{peak} 有比较强的相关性，它们共同影响了峰值时间，经过计算，在 GRB051117A 中，t_{rise}~$0.06t_{peak}$，t_{decay}~$0.12t_{peak}$。Chincarini[14]的图 5 显示，在 113 个耀发中，t_{rise}~ $0.05t_{peak}$，t_{decay}~ $0.14t_{peak}$，GRB051117A 也具有相似的比例。

图 4 显示了宽度与上升、衰减时间之间的相关关系，GRB051117A 中耀发宽度与上升时间最佳拟合关系为$w = 10^{(-0.17\pm0.31)} t_{rise}^{(0.83\pm0.15)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.79（$p=9.8\times10^{-3}$），耀发宽度与耀发衰减时间的最佳拟合关系：$w = 10^{(-0.39\pm0.15)} t_{decay}^{(1.1\pm0.07)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.98（$p \sim 0$）。宽度与上升时间有非常强的相关性，类似的关系在瞬时辐射脉冲中也存在，比如 Kocevski 等人[23]2003 年文章的图 10 便给出了脉冲的上升时间与脉冲半宽具有非常强的正相关关系。而我们发现不管是伽玛暴之间的耀发，伽玛暴内部的耀发还是瞬时辐射脉冲之间，都有相似的宽度与上升、衰减时间之间的相关关系。

图 5 显示出的特性参数（t_{peak}、w、t_{rise}、t_{decay}）与其不对称性的散点图，k 越大的方向即为不对称性越强的方向。无论是瞬时辐射脉冲，伽玛暴之间的耀发和伽玛暴之内的耀发，我们并没有找到任何的相关性，不对称性似乎是与其他特性参数无关的。

4 总结与讨论

我们使用 DCF 方法对一个具有 10 个耀发的多耀发伽玛暴（GRB051117A）的谱延迟性质进行分析，我们发现在 GRB051117A 中，谱延迟的大小与耀发的峰值时间呈正相关关系，即谱延迟大小随着时间的推移呈现出整体上升的趋势。影响 GRB051117A 中耀发的谱延迟大小的主要因素是耀发本身的宽度，即耀发越宽，谱延迟越大。这支持了 Margutti 等人[15]的结论，即耀发是随着时间演化的，随着时间的推移，耀发的宽度越大，谱延迟也越大。Norris 等人 2005 年文章的图 4 指出[20]，在瞬时辐射脉冲谱延迟与脉冲宽度也呈现一个正相关关系，宽度与脉冲峰值时间也呈现正相关关系，即在瞬时辐射脉冲中也存在随着时间的推

移，脉冲宽度越大，谱延迟越大的现象，并且我们的图 2 也显示出脉冲与耀发具有相似的延迟与特性参数之间的相关关系，这些也为瞬时辐射脉冲与 X 射线余辉耀发可能具有相似产生机制提供支持。

然而，我们发现，虽然 X 射线耀发的宽度、上升时间、衰减时间都大于来自 N05 的脉冲，但是它们的谱延迟却相差不大，可能造成这种情况的原因有以下两个：(1)样本的选择效应，N05 文中使用的样本是大延迟脉冲，平均延迟大于 1-2s，而我们使用的 GRB051117A 的耀发是属于比较窄的耀发，谱延迟比较小；（2）能道选择不同，计算 X 射线耀发谱延迟的能道是相邻能道，而瞬时辐射脉冲能道选择并不是相邻能道。通常情况下，相邻能道计算的谱延迟结果比较小。但根据图 2 中显示的趋势，即使包括了谱延迟较小的暴，瞬时辐射脉冲也不是 X 射线耀发的延伸，这表明 GRB051117A 的 X 射线耀发与大延迟脉冲可能产生于不同的物理条件，不过这也可能只是受样本选择的影响，还需要以后扩大样本来进行更深入的研究。

GRB051117A 中耀发的谱延迟与耀发上升时间、衰减时间都呈正相关关系，即耀发的上升时间与衰减时间共同影响了谱延迟大小。这些结果与 Margutti 等人[15]的图 7 相似。GRB051117A 中耀发上升时间与衰减时间是一个正相关关系，t_{decay}~$1.9t_{rise}$，这与 Chincarini 等人[14]统计的 113 个耀发之后显示的结果相似。通过研究 GRB051117A 谱延迟与耀发特性参数的关系，所以我们认为多个伽玛暴之间存在的谱延迟与耀发特性参数之间的关系也存在于多耀发伽玛暴内部。

伽玛暴之内的耀发存在的耀发特性参数之间的各种相关关系是高度相似于 Margutti 等人给出的多个伽玛暴之间存在的耀发特性参数之间的相关关系，同样与瞬时辐射脉冲也高度一致，这为瞬时辐射脉冲与 X 射线余辉耀发可能是同一物理起源提供证据。

我们估计的 GRB051117A 中的谱延迟相比较 Margutti 等人[15]给出的 8 个伽玛暴的 9 个耀发的谱延迟偏小，所以导致了谱延迟与宽度、峰值时间、上升时间、衰减时间相关性虽然一致，但是我们给出的斜率却与 Margutti 等人[15]图 7 给出的的斜率相差比较大，造成这种现象的原因可能是：（1）样本处理的信噪比与能道选择不同。我们的样本的信噪比为 2.4，而 Margutti 等人[15]选择的信噪比为 4，这势必会造成谱延迟结果有偏差。我们两个能道为 0.3-1.5keV 和 1.5-10keV，这是两个相邻能道，由这两个能道计算的谱延迟会比 Margutti 等人[15]文中 0.3-1keV 与 2-3keV 两个能道计算的谱延迟要小。（2）计算谱延迟的方法不同，我们使用 DCF 方法估计谱延迟，而 Margutti 等人[15]使用了拟合光变曲线比较 t_{peak} 差值的方法，这两种方法计算出的延迟大小应该相差不大，然而，对于 GRB051117A 这种具有极其复杂结构的多耀发伽玛暴来说，在使用 Norris 模型拟合耀发的过程中，拟合优度并不能保证，这就造成了对于 t_{peak} 的判定并不准确，导致了谱延迟计算的不准确，这可能也是 GRB051117A 某些耀发特性参数误差比较大的原因。使用 DCF 计算整个耀发的综合延迟会避免这种情况发生，但是由于 SWIFT XRT 数据是离散的，DCF 也只能估计耀发的延迟，估计的准确性与数据本身有关，我们使用高斯模型拟合 DCF 曲线可以去除噪声的干扰，然而，

光变曲线数据时间间隔的稳定性对 DCF 估计延迟的准确性也起着决定性的因素，比如，耀发的上升时间时间间隔稳定在 2s 左右，下降时间的时间间隔突然变大，达到 10s 左右，这就势必导致 DCF 估计延迟不会很准确。根据不同的样本，选择不同的方法计算谱延迟，这样才能使谱延迟的研究更为严谨和准确。

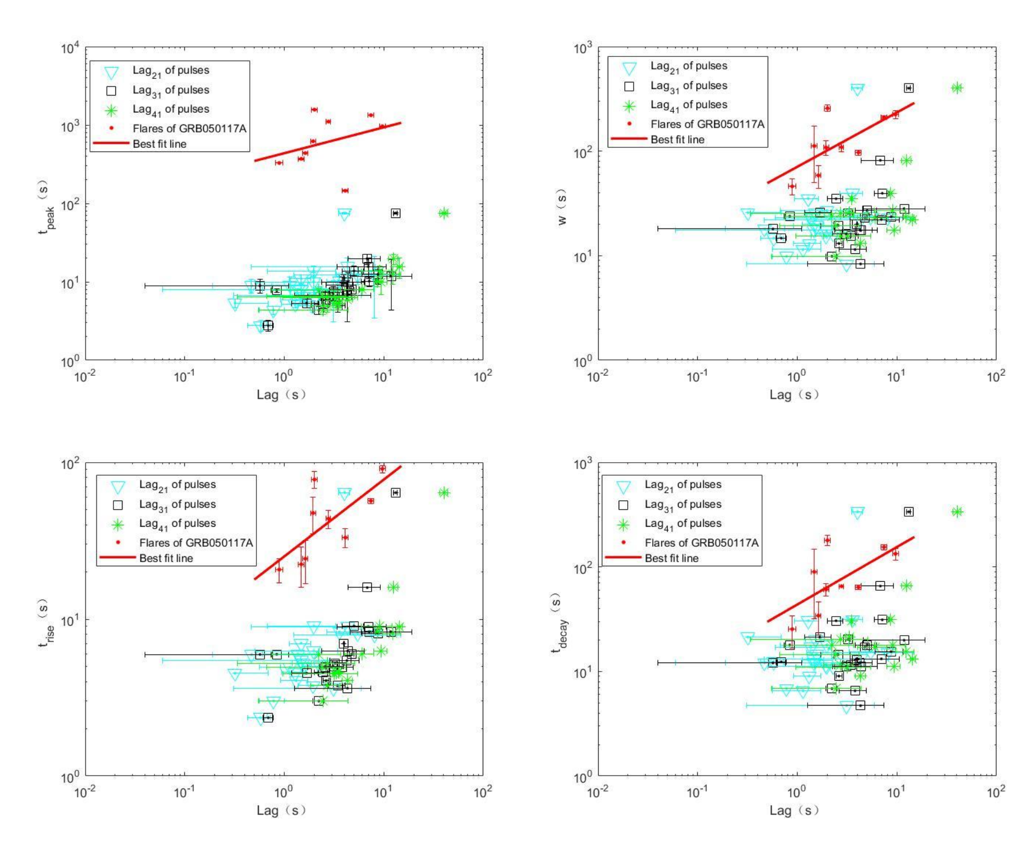


图 2 谱延迟与时间特性参数的相关关系。蓝色三角、黑色方块、绿色星号分别是脉冲第二能道、第三能道、第四能道相比第一能道的谱延迟。红色点是 GRB051117A 的 9 个耀发，红色实线是最佳拟合线。左上：延迟与耀发峰值时间的相关关系，红色实线是最佳拟合线：$t_{peak} = 10^{(2.64\pm0.18)} lag^{(0.33\pm0.35)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.45（p=2.2×10^{-1}）。右上：延迟与耀发宽度的相关关系，红色实线是最佳拟合线：$width = 10^{(1.85\pm0.1)} lag^{(0.52\pm0.2)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.57（p=1.2×10^{-1}）。左下：延迟与耀发上升时间的相关关系，红色实线是最佳拟合线：$t_{rise} = 10^{(1.4\pm0.09)} lag^{(0.49\pm0.18)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.8（p=1.3×10^{-2}）。右下：延迟与耀发衰减时间的相关关系，红色实线是最佳拟合线：$t_{decay} = 10^{(1.64\pm0.12)} lag^{(0.55\pm0.24)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.6（p=9.68×10^{-2}）。

Fig.2 The correlation between the spectral lag and the time characteristic parameters. The blue triangle, black square, and green asterisk are the spectral lags of the second, third, and fourth channels compared to the first channel of the pulse. The red dots are the ten flares of GRB051117A, the solid red line is the best fit line. Upper left: Correlated between lag and t_{peak} , the red line indicates the best-fitting relation: $t_{peak} = 10^{(2.64\pm0.18)} lag^{(0.33\pm0.35)}$, the spearman correlation coefficient is 0.45 (p=2.2×10^{-1}). Upper right: Correlated between lag and width, the red line indicates the best-fitting relation: $width = 10^{(1.85\pm0.1)} lag^{(0.52\pm0.2)}$, the spearman correlation coefficient is 0.57 (p=1.2×10^{-1}). Lower left: Correlated between lag and t_{rise} the red line indicates the best-fitting relation: $t_{rise} = 10^{(1.4\pm0.09)} lag^{(0.49\pm0.18)}$, the spearman correlation coefficient is 0.8 (p=1.3×10^{-2}). Lower right: Correlated between lag and t_{decay} the red line indicates the best-fitting relation: $t_{decay} = 10^{(1.64\pm0.12)} lag^{(0.55\pm0.24)}$, the spearman correlation coefficient is 0.6 (p=9.68×10^{-2}).

表 1 GRB051117A10 个耀发的 Norris 模型拟合参数以及谱延迟

Table. 1 Norris model fitting parameters and spectral lag of 10 flares of GRB051117A

flare	t_{peak} (s)	w (s)	k	t_{rise}(s)	t_{decay}(s)	Lag(s)
1	145±2.5	97.1±5.4	0.3±0.1	33.1±4.6	64±2.9	4.11±0.26
2	327.5±-	46±8	0.1±0.2	20.7±3.6	25.4±8.6	0.89±0.07

3	37±7.8	112±61.8	0.6±0.2	22.4±6.5	89.6±57.9	1.48±0.1
4	437.8±4.4	58.6±14.3	0.2±0.2	24.3±7.4	34.2±12	1.63±0.1
5	499.1±6.6	85.9±29.5	0.4±0.2	26±6.8	60±28.4	-0.01±0.01
6	619.6±-	108.2±16.7	0.1±0.1	47.5±12.5	60.8±8.3	1.95±0.11
7	962.1±4.9	224±18.5	0.2±0.1	90.8±4.8	133.2±17.2	9.68±0.68
8	1104.3±3.8	109±10.9	0.2±0.1	43.7±5.9	65.3±7.8	2.78±0.13
9	1332.9±2.1	211±7.9	0.5±0	56.7±2	154.3±8.2	7.43±0.51
10	1569±7.3	257.2±19	0.4±0.1	77.7±9.3	179.5±20.6	2.01±0.15

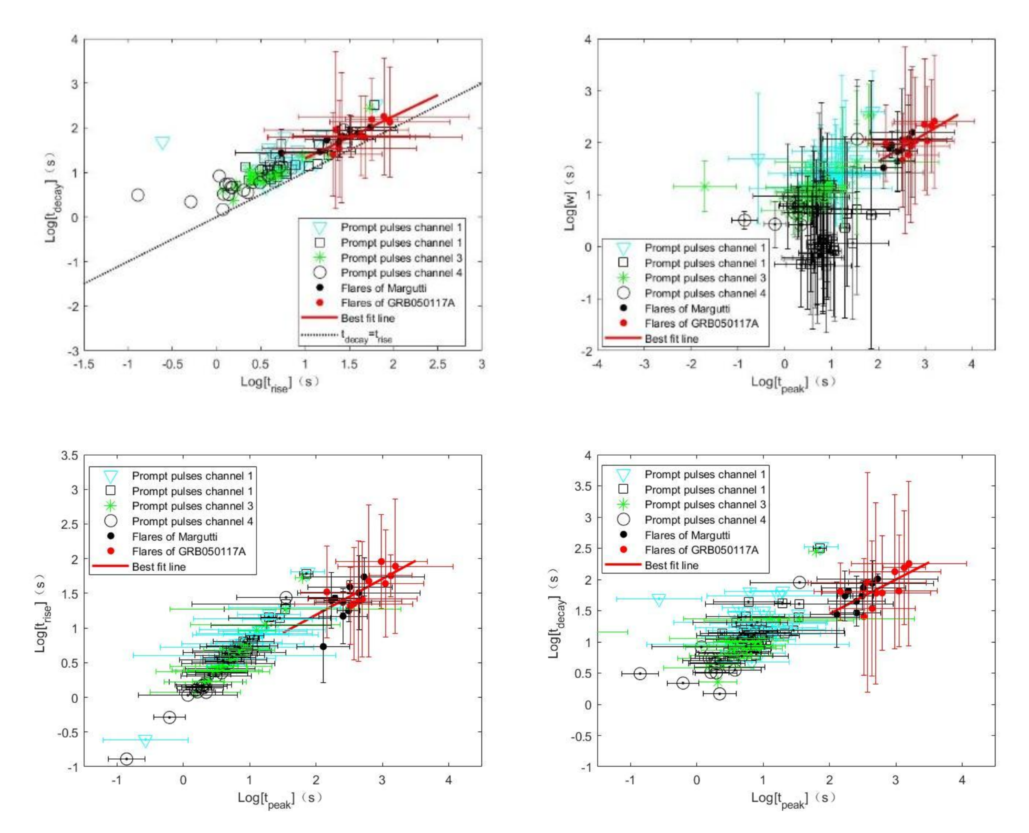


图 3 时间特性参数的散点图。红色点是 GRB050117A 的 10 个耀发，黑色点是 M10 中的 9 个耀发，蓝色三角，黑色方块、绿色星号，黑色圆圈分别是来自 NO5 中的第一能道、第二能道、第三能道、第四能道的脉冲。红色实线：GRB051117A10 个耀发的最佳拟合曲线。黑色点线：$t_{decay}=t_{rise}$。左上：耀发上升时间与衰减时间的最佳拟合关系：$t_{decay}=10^{(0.36\pm0.41)}t_{rise}^{(0.98\pm0.26)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.75（p=1.84×10^{-2}）。右上：耀发峰值时间与耀发宽度的最佳拟合关系：$t_{peak}=10^{(0.58\pm0.54)}w^{(0.53\pm0.19)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.73（p=2.12×10^{-2}）。左下：耀发峰值时间与耀发上升时间的最佳拟合关系：$t_{rise}=10^{(0.15\pm0.38)}t_{peak}^{(0.52\pm0.17)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.78（p=1.17×10^{-2}）。右下：耀发峰值时间与耀发衰减时间的最佳拟合关系：$t_{decay}=10^{(0.35\pm0.64)}t_{peak}^{(0.55\pm0.23)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.7（p=3.11×10^{-2}）。

Fig .3 Scatter plot of the temporal parameters. The red dots are the ten flares of GRB051117A, the black dots are the 9 flares of M10, the blue triangle, the black square, the green asterisk, and the black circle are the pulses from the first channel, the second channel, the third channel, and the fourth channel in NO5. The solid red line: the best fit line of 10 flares of GRB051117A. Black dotted line: $t_{decay}=t_{rise}$. Upper left: The best fitting relation between the rise time and the decay time of flares: $t_{decay}=10^{(0.36\pm0.41)}t_{rise}^{(0.98\pm0.26)}$, the spearman correlation coefficient is 0.75 (p=1.84×10^{-2}). Upper right: The best fitting relation between the peak time and the width of flares: $t_{peak}=10^{(0.58\pm0.54)}w^{(0.53\pm0.19)}$, the spearman correlation coefficient is 0.73 (p=2.12×10^{-2}). Lower left: The best fitting relation between the peak time and the rise time of flares: $t_{rise}=10^{(0.15\pm0.38)}t_{peak}^{(0.52\pm0.17)}$, the spearman correlation coefficient is 0.78 (p=1.17×10^{-2}). Lower right: The best fitting relation between the peak time and the decay time of flares: $t_{decay}=10^{(0.35\pm0.64)}t_{peak}^{(0.55\pm0.23)}$, the spearman

correlation coefficient is 0.7 (p=3.11×10^{-2}).

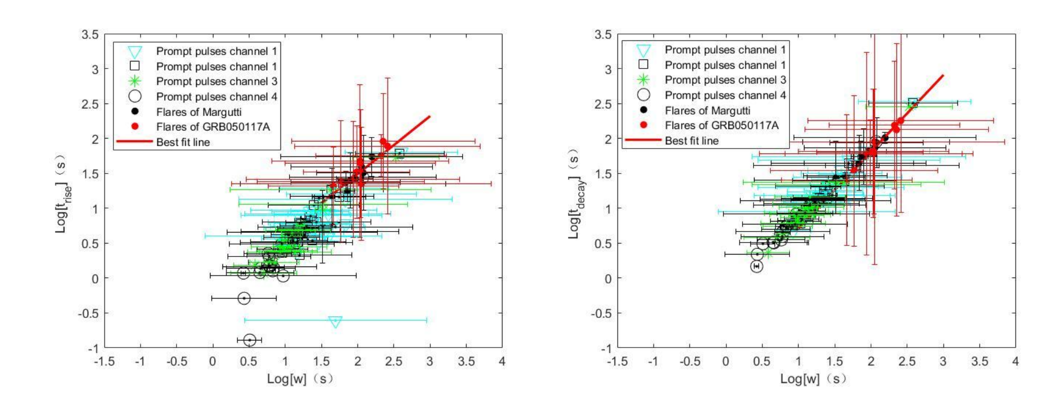


图 4 宽度和上升时间、衰减时间相关关系.。红色点是 GRB050117A 的 10 个耀发，黑色点是 M10 中的 9 个耀发，蓝色三角，黑色方块、绿色星号，黑色圆圈分别是来自 NO5 中的第一能道、第二能道、第三能道、第四能道的脉冲。红色实线：GRB051117A10 个耀发的最佳拟合曲线。左图：耀发宽度与耀发上升时间的最佳拟合关系：$w = 10^{(-0.17\pm0.31)}t_{rise}^{(0.83\pm0.15)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.79（p=9.8×10^{-3}）。右图：耀发宽度与耀发衰减时间的最佳拟合关系：$w = 10^{(-0.39\pm0.15)}t_{decay}^{(1.1\pm0.07)}$，斯皮尔曼相关系数为 0.98（p ~ 0）。

Fig 4. Correlation between width and rise/decay time. The red dots are the ten flares of GRB051117A, the black dots are the 9 flares of M10, the blue triangle, the black square, the green asterisk, and the black circle are the pulses from the first channel, the second channel, the third channel, and the fourth channel in NO5. The solid red line: the best fit line of 10 flares of GRB051117A. Left: The best fitting relationship between width and rise time of flares: $w = 10^{(-0.17\pm0.31)}t_{rise}^{(0.83\pm0.15)}$, the spearman correlation coefficient is 0.79 (p=9.8×10^{-3}). Right: The best fitting relationship between width and decay time of flares: $w = 10^{(-0.39\pm0.15)}t_{decay}^{(1.1\pm0.07)}$, the spearman correlation coefficient is 0.98 (p ~ 0).

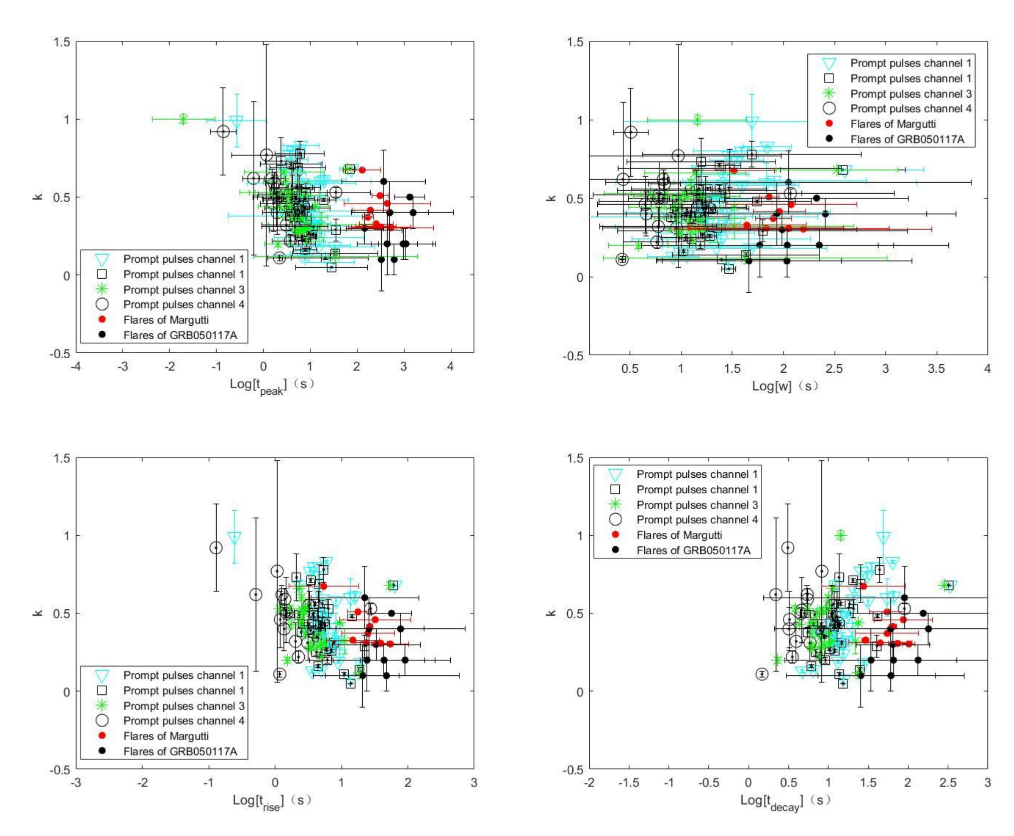


图 5 峰值时间、宽度、上升时间、衰减时间与不对称性 k 之间的相关关系。红色点是 GRB050117A 的 10 个耀发，黑色点是

M10 中的 9 个耀发，蓝色三角，黑色方块、绿色星号，黑色圆圈分别是来自 NO5 中的第一能道、第二能道、第三能道、第四能道的脉冲。

Fig.5 Correlation between peak time, width, rise time, decay time and asymmetry k. The red dots are the ten flares of GRB051117A, the black dots are the 9 flares of M10, the blue triangle, the black square, the green asterisk, and the black circle are the pulses from the first channel, the second channel, the third channel, and the fourth channel in NO5. The solid red line: the best fit line of 10 flares of GRB051117A.

致谢：感谢国家自然科学基金资助项目(11763009)的资助。本文使用主要数据：GRB051117A 耀发特性参数引用自文[14]，M10 引用自文[15],N05 引用自文[20],在此感谢三位作者提供的数据帮助。

参考文献

[1]Norris J P , Marani G F , Bonnell J T . Connection Between Energy-dependent Lags And Peak Luminosity In Gamma-ray Bursts[J]. Astrophysical Journal, 1999, 534(1):248-257.

[2]Ukwatta T N , Stamatikos M , Dhuga K S , et al. Spectral Lags and the Lag-Luminosity Relation: An Investigation with Swift BAT Gamma-ray Bursts[J]. Astrophysical Journal, 2009, 711(2):1073-1086.

[3]Hakkila J , Giblin T W , Young K C , et al. A Gamma-Ray Burst Database of BATSE Spectral Lag and Internal Luminosity Function Values[J]. Astrophysical Journal Supplement, 2007, 169(1):62.

[4]Yi T , Liang E , Qin Y , et al. On the Spectral Lags of the Short Gamma-Ray Bursts[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 367(4):1751-1756.

[5]易庭丰. 伽玛射线暴高低能光子的时滞效应和脉冲光变曲线[D]. 广西大学, 2006.

[6]Roychoudhury A , Sarkar S K , Bhadra A . Spectral Lag Features of GRB 060814 from Swift BAT and Suzaku Observations[J]. Astrophysical Journal, 2014, 782(2):41-41.

[7]Kocevski D , Liang E . The Connection between Spectral Evolution and Gamma-Ray Burst Lag[J]. The Astrophysical Journal, 2008, 594(1):385.

[8]Ryde F , Petrosian V . Gamma-Ray Burst Spectra and Light Curves as Signatures of a Relativistically Expanding Plasma[J]. Astrophysical Journal, 2015, 578(1).

[9]Spectral lag of gamma‐ray bursts caused by the intrinsic spectral evolution and the curvature effect[J]. Astronomische Nachrichten, 2011, 332(1):92-101.

[10]Burrows, D. N . Bright x-ray flares in gamma-ray burst afterglows.[J]. ence (New York, N.Y.), 2018, 2005 年 309 卷 5742 期(5742):1833-5 页.

[11]Zhang B , Fan Y , Dyks J , et al. Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations[J]. The Astrophysical Journal, 2006, 642(1):354-370.

[12]Fan Y Z , Zhang B , Proga D . Linearly Polarized X-Ray Flares following Short Gamma-Ray Bursts[J]. Astrophysical Journal, 2005, 635(2).

[13]Wang K , Dai Z G . GeV Emission during X-Ray Flares from Late Internal Shocks: Application to GRB 100728A[J]. Astrophysical Journal, 2013, 772(2):152.

[14]Chincarini G , Mao J , Margutti R , et al. Unveiling the origin of X-ray flares in Gamma-Ray Bursts[J]. Monthly Notices of the Royal

Astronomical Society, 2010, 406(4):2113-2148.

[15]Margutti R , Guidorzi C , Chincarini G , et al. Lag-luminosity relation in γ-ray burst X-ray flares: a direct link to the prompt emission[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 406(4):2149–2167.

[16]Sonbas E , Maclachlan G A , Shenoy A , et al. A New Correlation Between GRB X-Ray Flares And The Prompt Emission[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2012, 767(2).

[17]Goad M R , Page K L , Godet O , et al. Swift multi-wavelength observations of the bright flaring burst GRB051117A[J]. Astronomy & Astrophysics, 2006, 468(1):103-112.

[18] Evans P A , Beardmore A P , Page K L , et al. An online repository of Swift/XRT light curves of GRBs[J]. Astronomy & Astrophysics, 2007, 469(1):379-385.

[19] Evans P A , Beardmore A P , Page K L , et al. Methods and results of an automatic analysis of a complete sample of Swift-XRT observations of GRBs[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 397.

[20]Norris J P , Bonnell J T , Kazanas D , et al. Long-lag, Wide-Pulse Gamma-Ray Bursts[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 627(1).

[21]梁云峰. 基于 Fermi 数据的伽玛暴能谱延迟性质的研究[D]. 广西大学, 2013.

[22] Band L . Gamma-Ray Burst Spectral Evolution through Cross-Correlations of Discriminator Light Curves[J]. The Astrophysical Journal, 1997, 486(2):928.

[23]Kocevski D , Ryde F , Liang E . Search for Relativistic Curvature Effects in Gamma-Ray Burst Pulses[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 596(1):389-400.

Study on spectral lag and flare characters based on GRB051117A

CHANG Xue-zhao, PENG Zhao-yang, WANG Dao-zhou, CHEN Jia-ming

(College of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University , Kunming 650092, China)

Abstract: Margutti et al. found a strong correlation between the spectral lag of flare and its characteristic parameters (peak time, width, rise time, and decay time) in 8 GRBs, and as time goes on, the flare becomes wider and the spectral lag becomes larger. We use the discrete-correlation function (DCF) to study the spectral lag of a multi-flare GRB (GRB051117A) with 10 flares, it is found that within GRB051117A, the spectral lag is also strongly correlated with the peak time, width, rise time and decay time of the flares. this is, $lag \propto t_{peak}$、ω、t_{rise}、t_{decay}. The flares will also evolve over time within a GRB. This work extends the relationship between the spectral lag between GRBs and the characteristic parameters of flares to the interior of GRBs, which can help us have a deeper understanding of multi-flare GRBs. Moreover, the correlation between the flare characteristic parameters within GRB051117A is highly similar to that between multiple GRBs and even prompt emission pulses. This also supports that X-ray flares and prompt emission pulses may have the same physical origin.

Key words: GRBs; X-ray flare; DCF; spectral lag